

建設・環境分野の CFD 研究の動向

Current Trend in CFD Research related to Building Engineering and Environmental Problems

持田 灯*

*東北大学大学院工学研究科

Akashi Mochida

*Tohoku University

E-mail:mochida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp

1 はじめに

本稿では、第 15 回数値流体シンポの発表の中から、筆者（持田）の専門と関係する建築、都市関係の研究を中心に、スケールの近い土木分野の研究やこれらと関連する気象の発表も一部含めて報告する。カバーする領域が幅広く、表面的紹介とならざるを得ないことをあらかじめお詫びしておきたい。

2 都市環境・広域環境 (Figs. 1-4)

(1) 植生の気候緩和効果のモデリング

公園緑地等の植生の気候緩和効果の研究は、近年の都市環境、建築環境分野の最もホットな話題の一つであり、昨年に比べ、発表数が増加している。

「植生内熱水分収支モデルの検証」(E01-1, 平岡)は、著者が提案した植生内の熱・水分・二酸化炭素収支モデルを用いた計算結果と測定データを比較し、その精度の検証を行ったものである。樹木のモデル化の具体的内容については前回の第 14 回数値流体シンポで発表されているが、著者の多年の研究成果が注ぎ込まれた極めて詳細なものである。今回の結果を見ると計算結果は測定値と良い一致をしている (Fig.1)。

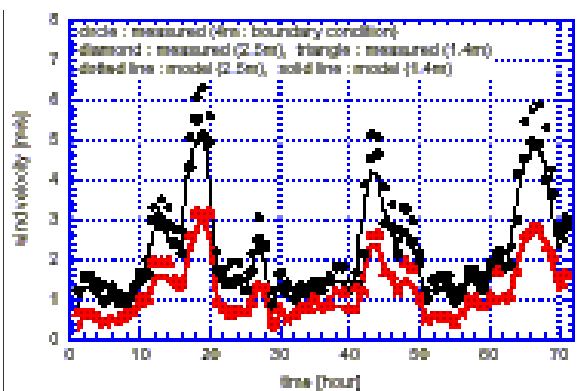


Fig.1 Diurnal variations of wind velocity within a tree canopy (Hiraoka, E01-1)

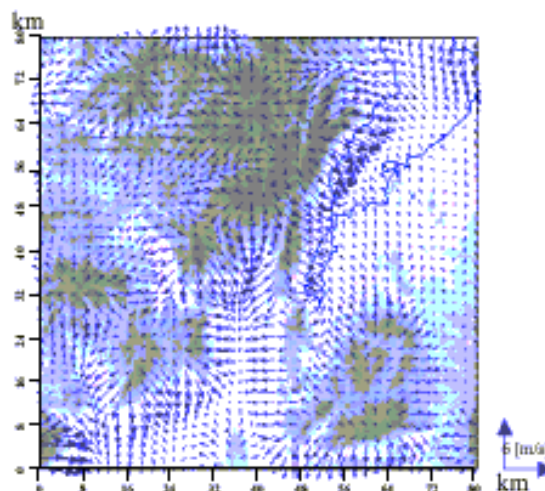


Fig.2 Regional climate in Kinki district
(Kim et al., E01-2)

「1 次元植物キャノピーモデルを用いた大気境界層モデルの構築とその精度の検討」(E01-2, 金他)では, 植生層の流体力学的効果、熱・水分収支を考慮した 1 次元キャノピーモデルを作成し、サブモデルをとしてこれを組込んだ近畿地方のメソ気象の 3 次元解析を行い、アメダスデータとの比較によりその結果の妥当性を検討している (Fig.2)。従来の気象解析では、森林や建物等の効果を単純に粗度長で表す場合が多かったが、そのような単純なアプローチには限界があるのは明らかであり、キャノピー層のモデリングは非常に応用分野の広い重要なテーマと思われる。

「振動する稲穂の波と植生層流れの乱流構造」(C03-4, 日野)では、稲穂の発生メカニズムや植生層内の乱流構造について、著者らの作成した LES に基づく数値モデルより詳細に検討した結果が報告され、多くの注目を集めた。

(2) 都市内緑地・壁面緑化の効果分析

「公園緑地からの冷気の流出とその熱的效果に関する CFD 解析」(E01-4, 佐々木他)では、仙台市内の大規模な公園緑地とその周辺市街地の温熱環境を改良 $k-\varepsilon$ モデルにより解析した結果を示した。本研究では、解析対象と同じ地区の温熱環境の実測調査も行っており、解析結果との比較を示すとともに、都市内の貴重な冷熱源としての公園緑地の熱的效果を CFD の結果を用いて評価している (Fig.3)。

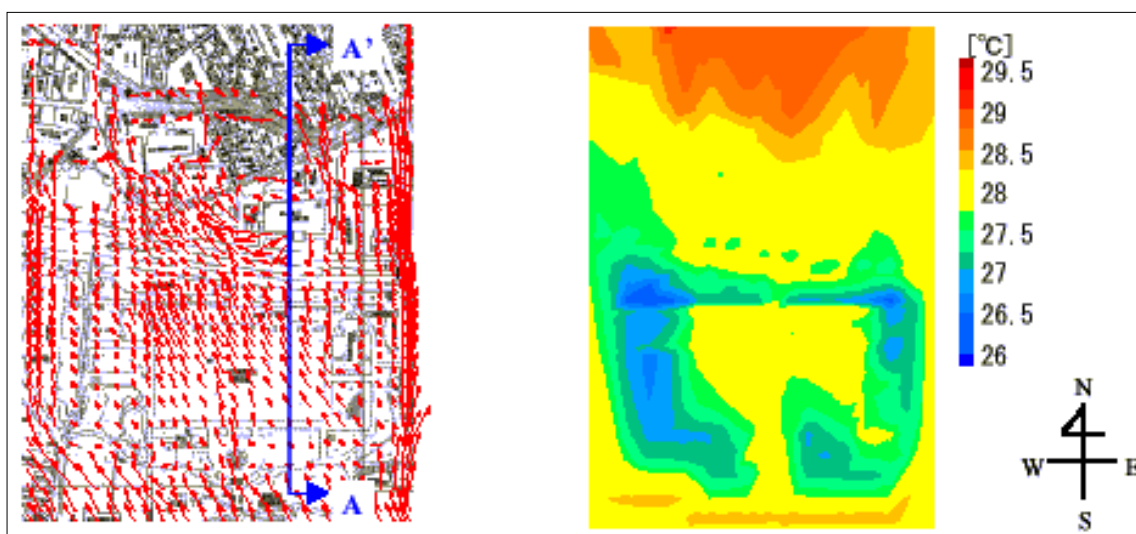


Fig.3 Horizontal distributions of wind velocity and temperature in and around a planted park (Sasaki et al., E01-4)

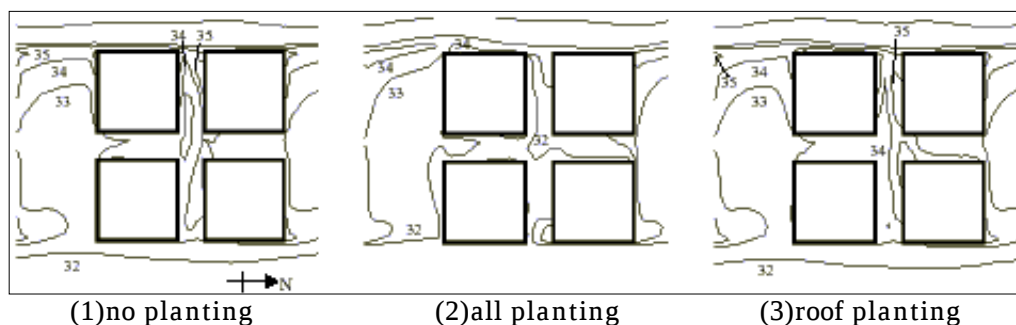


Fig.4 Effect of various building surface planting on outdoor air temperature (CHEN et al., E01-4)

「CFD による建物表面緑化の屋外環境緩和手法の検討」(E02-2, 陳他) は、これよりもやや小スケールの領域を対象とし、CFD と放射計算の連成解析により建物の壁面緑化のもたらす夏季の気候緩和効果を試算している (Fig.4)。屋上緑化はヒートアイランド対策の一つとして現在多くの自治体で注目されている。例えば、東京都は一定規模以上の建物には条例により屋上緑化を義務づけているが、筆者 (持田) は、その効果が過大に評価されているのではないかという印象を持っている。今回のような解析を積み重ね、緑化が有効なのはどのような場合であり、どのような場合は効果が少ないのかを明らかにして行く必要があると思う。

(3) エネルギー消費に伴う人工排熱と都市環境

「人工排熱が都市のヒートアイランド現象に及ぼす影響の CFD 解析」(E03-2, 吉田他) では、首都圏の夏季を対象とした局地気候解析を行い、エネルギー消費に伴う人工排熱の増減がヒートアイランド形成に及ぼす影響と、その取り扱いの相違が予測結果に及ぼす影響について検討した結果が報告された。今後、著者らにより、各種省エネ対策を導入した後のヒートアイランド抑制効果の定量化がなされていくものと期待する。

(4) 関連する研究

「VCA を用いた気象場の初期値決定に関する研究」(E03-3, 吉村他) では、メソスケールの気象解析の初期条件として適切な初期値の空間分布を、4 次元変分法に基づく同化手法により生成する方法について研究している。また、「エクマン境界層内における乱流熱伝達の DNS」(C03-1, 谷他) では、エクマン境界層を対象とした DNS のデータから平均速度、レイノルズ応力及び乱流熱流束の空間分布の 3 次元的特徴について検討した結果が報告された。

3 建物・bluff body まわりの流れ

「境界層流中の 1:1:2 直方体周辺流れの LES」(C06-1, 富永他) は、高層建物周辺のビル風の予測に関して、LES と改良 $k-\varepsilon$ モデルの精度を比較したものである。各種の改良 $k-\varepsilon$ モデルの結果が、いずれも建物後方の循環流のサイズを大きめに評価するのに対して、LES の場合、かなり粗い grid を用いた単純素朴な Smagorinsky モデルによる結果でも実験とよく一致している。建物後方の循環流域のサイズは、vortex shedding 的な周期的変動によりもたらされる lateral 方向の運動輸送により大きな影響を受ける。このような現象を RANS でどこまで再現可能であるのか？ 筆者 (持田) は悲観的であり、この種の問題に対する LES の一日も早い実用化を期待し、研究を進めている。

4 建物周辺の Snowdrift (Fig.5)

「建物周りの雪の吹きだまり予測に対する数値計算の適用」(E02-1, 土屋他) は、改良 $k-\varepsilon$ モデルによる建物周辺気流の予測結果から風の水平方向の加速度を算出し、この値から雪の吹き溜まりを推定する方法を提案するとともに、風洞実験との比較によりその有効

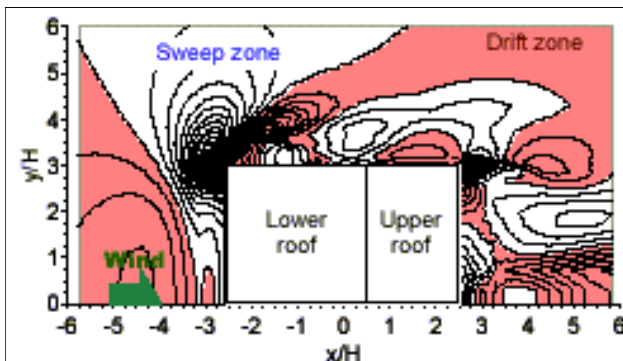


Fig.5 Relation between wind acceleration and snowdrift (TSUCHIYA et al., E02-1)

性を検証している。相似則の制約等により風洞実験を行うのが難しい現象を扱った研究である。市民生活に直結する問題であり、CFD がもっと利用されるべきテーマであると思う。

5 室内環境

(1) 人体まわりの微気候 (Figs.6 – 7)

シックハウス問題や人体の温熱快適性の問題と関連して、人体まわりの微気候の解析結果が 2 題報告された。

「隙間換気のある室内における人体による吸引空気性状の解析」(E02-3, 梁他) では、空調設備を持たない部屋における就寝時の人体まわりの気流分布、温度分布、汚染質濃度分布を詳細に解析し、壁面や床から放出された汚染質を人体がどのように吸入しているかを明らかにした (Fig.6)。

また「対流—放射連成解析による人体表面の対流熱流束の予測」(E06-1, 大森他) では、人体の形状を詳細に模擬した精密人体モデル周辺の微気候を、低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ 乱流モデルに基づく CFD 計算と放射計算を連成して解析し、人体表面の熱流束の分布を求めている (Fig.7)。

環境問題は最終的には、それらが人体にいかなる影響を与えるかが分からなければ、判断のしようがない場合が多い。これらの解析により、人体と周辺の環境との interaction のメカニズムを知るための貴重なデータが種々提示されるようになりつつある。

(2) 空調時の室内気候

空調時の室内環境予測は、建築関係で最も CFD の実用化が進んだ分野であるが、今回の発表は以下の 2 題のみであった。

「室内温熱環境の CFD 解析手法の開発—遺伝的アルゴリズムを組み込んだ 2 段階型最適設計—」(E02-5, 金他) は、CFD 解析を用いた室内環境の最適設計手法の開発を目的とする研究の一環である。室内環境設計時には、空調システム、室形状、空調負荷条件等の考慮すべきパラメータが多く、設計段階でオブ

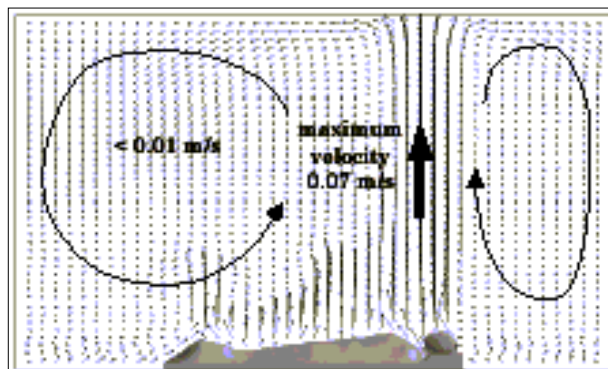


Fig.6 Flow distribution over a human body under natural infiltration (YANG et al., E02-3)

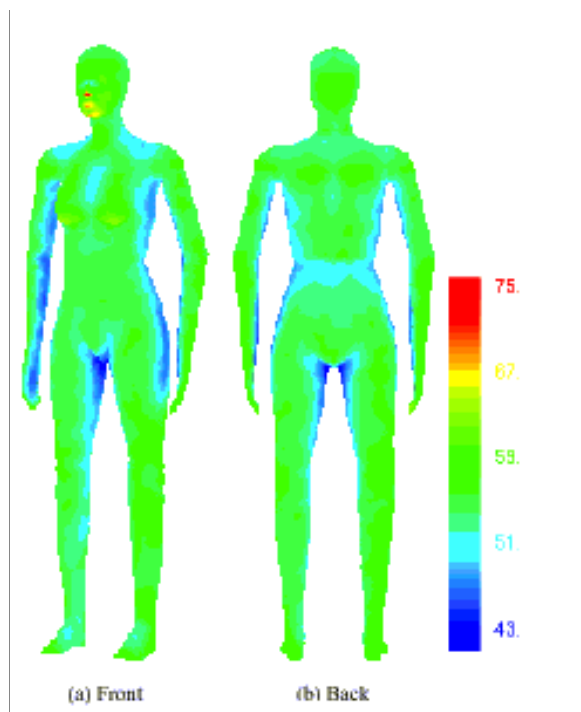


Fig. 7 Distribution of total heat flux from a human body (convection + radiation) (OMORI et al., E06-1)

ションとしてリストアップされる全ての条件に対して CFD 解析を行うことは実用上難しい。本研究では、まず遺伝的アルゴリズムを導入した (CFD を用いない) 簡易な解析を行い、これにより条件を絞った後に、CFD 解析を行うという二段階最適設計手法の提案を行っている。

「CFD を単なる解析 tool から環境設計のためのデザイン tool へ脱皮させよう」という東大生研グループの最近の方向性が色濃く出た研究である。

「断熱壁面を持つ室内流れの空調シミュレーション第 2 報」(E02-4, 大倉他) は、空調時の室内を対象とする CFD 解析において、吹出口からの注入される熱エネルギーをコンスタントとするように計算を進める方法について検討した。

6 火災気流

「応力方程式モデルによる室内モデル火災計算」(C09-4, 青柳他) では、火災実験時に生じる高温、高浮力乱流を応力方程式モデルで解析した結果が報告された。また、「道路トンネル火災の予測計算」(E11-5, 堀内他) では道路火災発生から 5 分間のトンネル内の気流分布、温度分布の変化を予測した結果が紹介された。非常に重要な CFD の応用分野であり、もっと多くの発表があってしかるべきだと思う。

7 地形風と風力エネルギー (Figs.8-9)

近年、風力発電施設の最適な立地選定のための風況予測に関連して、地形風の研究例が増加している。

「2 次元山を過ぎる流れのシミュレーション」(E03-1, 内田他) では、孤立した 2 次元山を対象に 2 次元 DNS と 3 次元 LES を行い、中立状態における渦放出の違いを詳しく検討した (Fig. 8)。

「乱流モデルによる衝突はく離・再付着を伴う流れの予測」(C08-2, 宮澤他) では、崖地形をモデル化した front-step まわりの流れを対象に、渦粘性係数を定義する時間スケールの評価式に歪速度および渦度を組み込んだ 2 つの改良 $k-\varepsilon$ モデルを提案している (Fig. 9)。

「Durbin 型 $k-\varepsilon$ モデルによる 2 次元崖地形まわりの流れの解析」(C09-1, 白澤他) では、崖コーナー部の性状を中心に Durbin 型 $k-\varepsilon$ の予測精度を検討した結果が報告された。次の「CFD Prediction Of Flow Over A Blunt Body By Revised $k-\varepsilon$ Models」(C09-2, Lun

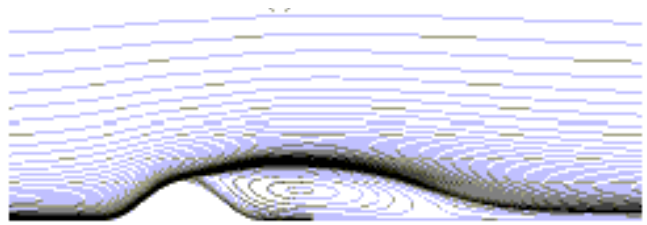


Fig. 8 Flow around a hill
- time-averaged streamline -
(UCHIDA et al., E03-1)

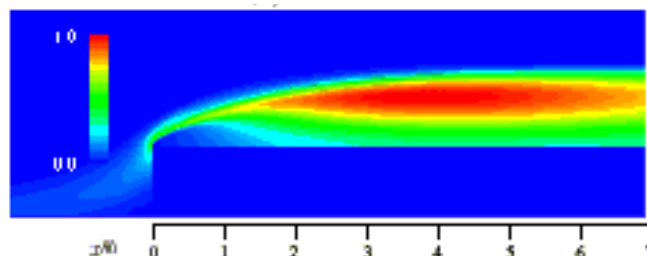


Fig. 9 Flow around a cliff
- turbulent kinetic energy -
(MIYAZAWA et al., C08-2)

他)は、Durbin、Shih らの提案する改良型 $k-\varepsilon$ モデル、そして名古屋工大のグループ (C08-2, 宮澤他) の発表にあった改良モデルを 2 次元山越え気流に適用し、風洞実験結果との比較から各モデルの精度を比較検討した。

なお、C08-2 と C009-1, C09-2 は慶應大の村上教授を代表として、名工大の長野教授、東大生研の加藤教授、日本気象協会、大林組、そして筆者らで進めている風力発電の立地選定のための局所風況予測モデルの開発に関する NEDO のプロジェクトの成果である。

8 河川・海洋関係 (Figs. 10-11)

(1) 河川

河川内の流れに関しては、以下の 3 題の発表があった。

「複断面蛇行開水路流れの三次元乱流数値解析」(E04-1, 杉山他) は、自然災害の予測や河川設計上重要な流れである、曲がりと直線開水路が複合し構成された蛇行開水路の流れ (Fig. 10) が氾濫した状況を対象としている。今回の報告では、応力方程式による数値解析と実験結果との比較から予測結果の信頼性を検証した結果が示された。

本年は “水制” まわりの流況についての研究が 2 題報告された。この “水制” とは、堤防保護や航路確保のために設置される河川構造物 (Fig. 11) であるが、その周辺に土砂が堆積して形成される入江状の地形から様々な流れ場が創出されるため、多様な生態系の保全・維持に有効であり、近年その機能が注目されているということである。

「斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析」(E04-2, 木村他) は、斜め越流型水制の設置角度の違いによる 3 次元流況の変化を非線形 $k-\varepsilon$ モデルで予測し、検討した (Fig. 11) 。「越流型水制群を有する開水路流れの 3 次元数値解析」(E04-3, 河原) も水制まわりの流れを非線形 $k-\varepsilon$ モデルで解析したものであり、実験との比較からその信頼性を検証している。

(2) 海洋

海洋に関する発表は 2 題であった。

「沿岸津波の予測数値シミュレーターの開発」(E04-4, 岩田他) は、沿岸津波の予測手法の開発を最終目標としている。傾斜海底を含む 2 次元鉛直壁面による孤立波の非線形性伝播のベンチマーク問題に関して解析を行い、実験値や他の計算値との比較分析を行い、解析結果の信頼性を検証している。

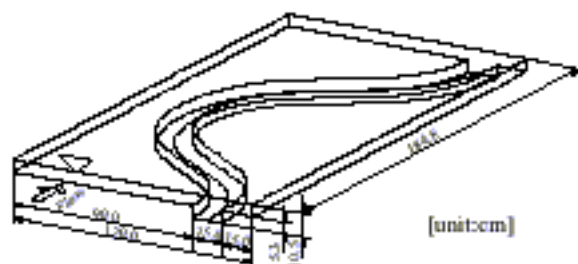


Fig.10 Compound meandering open-channel
(SUGIYAMA et al., E04-1)

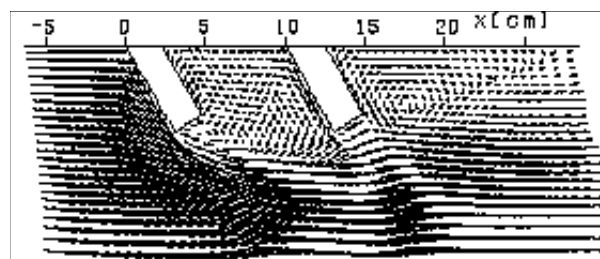


Fig.11 Flow around skewed spur dikes
(KIMURA et al., E04-2)

「海洋の変動流場の再現に関する方法論的研究」(E04-5, 佐藤他)は、LESにより100~1000m程度の領域を解析対象とする海洋内の流れのシミュレーションを行うために、実海域における測定流速データをもとに時間的・空間的に変動する初期条件・境界条件を生成する方法について検討したものである(Fig.12)。LESの境界条件としての流入変動風の生成は、近年、建築等の他分野で多くの研究が行われており、筆者はこの問題が、LESの実用化を進めるための最大の課題であると考えている。この問題についての各分野間の情報交換を行う意味から、C室のLESのセッションで発表していただくとよかったという印象である。

著者(持田)はこれまで河川、海洋の研究を余り follow してこなかったのだが、建物周辺気候や地形風と共通する点が多く、土木、建築間でももう少し情報交換を行う必要があると感じた。

9 その他関連研究

「LESによる壁乱流の大規模流れ構造に関する研究」(C04-3, 坪倉他)、「連続した段差を持つ乱流流れ場の数値解析」(C06-2, 池田他)、「チャンネル乱流におけるLESとk- ϵ モデルの結合」(C06-3, 半場)等の研究は、本稿の対象としては若干ずれるので言及しなかったが、建設・環境系の分野のCFD研究と関わりが深く、我々にとっても興味深い内容であった。

10 まとめ

以上示したように、人体スケールから建物・街区スケール、そして100kmオーダーのメソ気象に至る各種スケールの環境問題に関してCFDが広く利用されている。近年、建築系のCFDの研究は応用的なものが主流となりつつあり、数年前に比べて基礎的研究がかなり減少しているという印象を持った。未解決な研究課題は数多く残っているように思うのだが、比較的簡単に成果の出る研究テーマがこの分野で少なくなっているということの反映なのではないかと思う。

今回、本稿を書くにあたって、通常はあまり詳しく知る機会のない分野の研究にも触れることができ、大変有益であり、学際的交流の場としての本シンポの意義を再認識した。このようなチャンスを与えてくださった東大の荒川教授をはじめとする編集担当の先生方に感謝したい。ただし、パラレルセッションのため、自分で直接聞けなかった発表も多い。筆者が参加できなかったセッションは、東北大学大学院生の佐々木澄君、白澤多一君に手分けして参加して貰い、両君の協力のもとに本稿を作成したことを付記し、謝意を表したい。

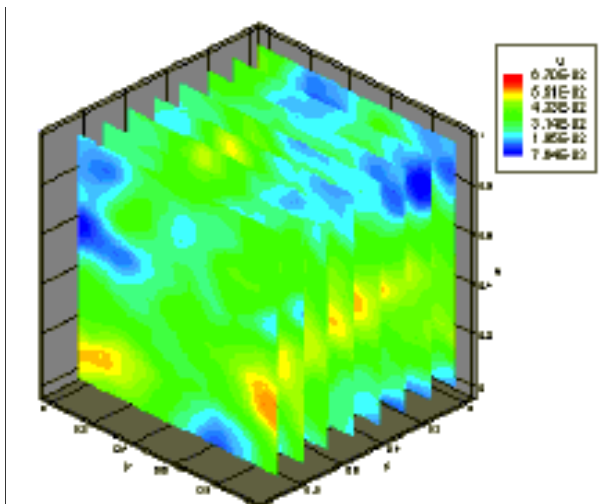


Fig.12 Turbulent velocity fluctuations in an ocean generated by numerical method (Sato et al., E04-5)